

陵水气田输气管道阴极保护效果数值仿真研究

侯静^{1,2}, 梁清文², 张宇³, 李开伟³, 侯健³

(1.中海油研究总院 北京 100028; 2.中海石油(中国)有限公司海南分公司, 广东 湛江 524000;
3.中船重工七二五所青岛分部 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266101)

摘要: **目的** 研究海水环境因素和工况因素对其海底管道的牺牲阳极阴极保护效果。**方法** 针对国内首个自主知识产权深水平台——陵水平台, 基于边界元开展管道的阴极保护仿真计算, 重点研究不同涂层破损率、海水流速和海水电导率对其管道牺牲阳极阴极保护效果的影响。**结果** 涂层破损率从1%增加到10%, 同样的牺牲阳极保护方案, 管道的最正阴极保护电位增加了102 mV; 海水电导率从4 S/m减小到2 S/m, 管道的最正阴极保护电位增加了10 mV; 海水流速从0 m/s增加到4 m/s, 管道的最正阴极保护电位增加了26 mV。**结论** 涂层破损率增大、海水电导率降低、海水流速增加等都会导致阴极保护效果的降低, 因此在设计阶段, 需要考虑环境工况因素对阴极保护效果的影响, 确保达到合理的阴极保护效果。

关键词: 海底管道; 阴极保护; 数值仿真

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.008

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)10-0050-07

Simulation Study on Influencing Factors of Sacrificial Anode Cathodic Protection Effect of Oil Pipeline of Lingshui Platform

HOU Jing^{1,2}, LIANG Qing-wen², ZHANG Yu³, LI Kai-wei³, HOU Jian³

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 2. CNOOC HaiNan Branch, Zhanjiang 524000, China; 3. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the sacrificial anode cathodic protection effect of seawater environmental factors and working conditions on its submarine pipelines. Aiming at the Lingshui platform, the first deep-water platform with independent intellectual property rights in China, the cathodic protection simulation calculation of pipelines was carried out based on boundary elements, focusing on the effects of different coating damage rates, seawater flow rate and seawater conductivity on the sacrificial anode protection of pipelines. As a result, the coating damage rate increased from 1% to 10%. With the same sacrificial anode protection scheme, the most positive cathodic protection potential of the pipeline increased by 102 mV; the seawater conductivity decreased from 4 S/m to 2 S/m. The positive cathodic protection potential increased by 10 mV; the seawater flow rate increased from 0 m/s to 4 m/s, and the most positive cathodic protection potential of the pipeline increased by 26 mV. The increase of coating breakage rate, decrease of seawater conductivity and the increase of seawater flow rate will reduce the cathodic protection effect. Therefore, in the design stage, the influence of environmental conditions on the cathodic protection ef-

收稿日期: 2020-05-29; 修订日期: 2020-06-30

Received: 2020-05-29; Revised: 2020-06-30

作者简介: 侯静(1977—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为海管结构设计、施工作业。

Biography: HOU Jing (1977—), Female, Senior engineer, Research focus: submarine pipe structure design and construction operations.

通讯作者: 张宇(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为腐蚀防护。

Corresponding author: ZHANG Yu (1990—), Male, Engineer, Research focus: corrosion protection research.

fect needs to be considered to ensure reasonable cathodic protection effect.

KEY WORDS: submarine pipeline; cathodic protection; numerical simulation

目前我国正在大力发展海洋油气资源,海洋资源战略一再被强调升为国家战略。在海洋资源大开发的背景下,海洋油气资源的运输面临压力,海底管道是油气资源运输的形式之一,海底管道的铺设工程耗资巨大,设计服役周期长^[1]。在海水环境中,腐蚀现象发生非常普遍,世界上,由于海底管道腐蚀导致的结构失效占 1/3,管道破损将带来巨大危害,且维修非常困难,因此海底管道的防腐非常重要^[2]。

在海洋环境中,涂层保护和阴极保护是常用的两种防腐手段。在实际工程中,都采用涂层保护和阴极保护联合的方案,确保海底管道的安全服役。阴极保护由于施工方便,且经济实用,因此广泛用于地下管网、船舶等领域。阴极保护方式分为外加电流阴极保护和牺牲阳极阴极保护,但在海底深处,外加电流阴极保护并不适用,且需要定期维护成本高。牺牲阳极阴极保护具有长效稳定,不需要维护等优点,广泛使用在海底管道防腐领域。常用的牺牲阳极分为镁基阳极、锌基阳极和铝基阳极。牺牲阳极的工作原理为在海水中自身发生腐蚀,向管道外壁提供阴极保护电流,达到管道防腐的目的^[3-7]。

近几十年,随着数学计算方法和计算机技术的飞速发展,数值仿真技术在阴极保护电位计算领域得到了广泛的应用,包括有线差分法、有限元和边界元法等,成为腐蚀领域等复杂结构阴极保护设计最优化的有效手段之一。相对于传统的经验设计方法,数值仿真设计通过仿真模型建立,导入边界条件,通过软件计算可以更加直观地研究牺牲阳极的保护效果,可以对牺牲阳极的数量和位置进行变化,来实现阴极保护优化。同时可以对海洋环境中的环境因素和涂层破损因素进行变量影响效果研究,从而掌握环境因素和工况因素对阴极保护设计的效果的影响强弱,更好地进行可靠的阴极保护设计。因此,开展海洋环境因素和涂层破损率对管道阴极保护效果的影响研究具有重要意义^[8-13]。

文中针对国内首个自主知识产权的深水平台——陵水油气田项目,通过 Beasy 软件建立海底管道和牺牲阳极的仿真模型,利用电化学工作站对不同环境因素和涂层破损率的电极试样进行极化曲线测定,确定仿真计算边界条件,对不同涂层破损率、海水电导率和海水流速的工况进行仿真计算,研究以上因素对管道牺牲阳极的保护效果影响,为实际工况的管道阴极保护设计工作做预测指导。

1 仿真原理

在电解质区域内,由欧姆定律知,模型表面电位

和电流密度满足方程(1)。

$$i = -k\nabla E \quad (1)$$

式中: J 为电流密度; E 为电位; k 为环境电导率。由式(1)可知,任意时刻微小立方体元($dx \times dy \times dz$)中电荷量的变化量为:

$$Q = k \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right) dx dy dz \quad (2)$$

当阴极保护系统产生的电场达到平衡状态时,微小体积元中的电量处于恒定状态,即 $Q=0$,则:

$$k\nabla^2 E = 0 \quad (3)$$

由此可知,阴极保护过程的控制方程为拉普拉斯方程。由格林公式得与方程(3)对应的边界积分方程,其中 Γ 为域 Ω 的边界:

$$c(\xi)E(\xi) + \int_{\Gamma} E(x)i^*(\xi, x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} i(x)E^*(\xi, x)d\Gamma(x) \quad (4)$$

式中:系数 $c(\xi)$ 只依赖于物理模型中边界的几何形状, $E^*(\xi, x)$ 和 $i^*(\xi, x)$ 为拉普拉斯方程电位和电流密度基本解。对于三维问题:

$$E^*(\xi, x) = \frac{1}{4\pi k r}, i^*(\xi, x) = k \frac{\partial E^*}{\partial n} \quad (5)$$

将边界 Γ 划分为 n 个单元后,方程(4)可转化为:

$$c_i E_i + \sum_{j=1}^n E_j \int_{\Gamma_j} i^* d\Gamma_j = \sum_{j=1}^n i_j \int_{\Gamma_j} E^* d\Gamma_j \quad (6)$$

定义: $\hat{H}_{ij} = \int_{\Gamma_j} i^* d\Gamma_j$; $G_{ij} = \int_{\Gamma_j} E^* d\Gamma_j$; $H_{ij} = \hat{H}_{ij} + c_i \delta_{ij}$, 其中, δ_{ij} 为克罗内克函数。

由(6)式可得:

$$\sum_{j=1}^n H_{ij} E_j = \sum_{j=1}^n G_{ij} i_j \quad (7)$$

通过求解矩阵方程(7)即可获得模型表面电位和电流密度分布^[14-21]。

2 模型建立

2.1 画图与网格划分

以某海底管道为研究对象,利用边界元建模软件对其进行数值建模画图,建立管道牺牲阳极阴极保护系统模型,如图1所示。管道直径为 0.311 m,管道长度为 50 m。牺牲阳极采用半镯式,数量为 2 个,长度为 0.45 m,厚度为 0.05 m。

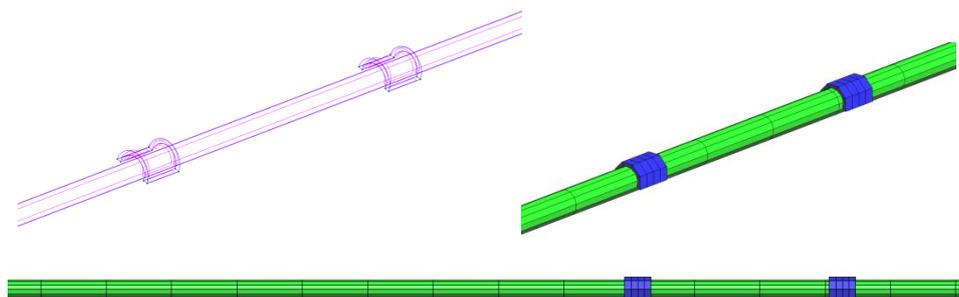


图1 管道及牺牲阳极边界元模型
Fig.1 Boundary element model of pipeline and sacrificial anode

2.2 模型网格法线方向校正

由于边界元模拟软件单元为面单元,模拟计算时需要将管道模型单元面的法线方向设置为由海水指向管道的方向(即电流经海水流向管道),法向校正后模型如图2所示。

3 边界条件测定

3.1 试验材料和方法

试验使用的材料为X65管线钢,材料成分见表1。将管线钢加工成10 mm×10 mm×10 mm的试样,一端钻M3×5 mm的螺孔,用螺钉拧上铜导线。然后

将试样用环氧树脂进行封样,只留取非钻孔端面为工作面。待树脂完全固化后,用水砂纸将工作面依次打磨至1200#,然后乙醇擦拭试样表面,冷风吹干,制备出电极试样。

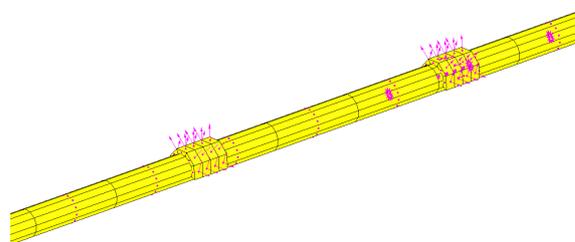


图2 网格法线方向校正图
Fig.2 Correction diagram of grid normal direction

表1 X65 管线钢元素含量
Tab.1 Steel content of X65 pipeline

元素	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Mo	Cr
质量分数/%	0.16	1.65	0.45	0.02	0.003	0.35	0.50	0.35	0.45
元素	Al	Nb	V	Ti	N	B	CE	P	Fe
质量分数/%	0.06	0.05	0.09	0.06	0.012	0.0005	0.42	0.22	余量

利用人工刻画的方法,制备涂层破损为1%、2%、4%、6%、10%的电极试样,腐蚀介质采用青岛天然海水,淡水采用天然海水添加蒸馏水配置,电导率分别为4、3、2 S/m。动态测试由水泵提供动力,流量计监测流速,阀门调节流速分别为2、4 m/s,所有试验的水温为4℃(由于陵水项目海底管道位于水下1500 m,常年水温为4℃),通过制冷循环控制。

采用三电极体系进行电化学测试,管线钢试样、饱和甘汞电极、铂片依次为工作电极、参比电极和辅助电极,动电位极化的极化扫描速率为10 mV/min,测试采用AMETEK VersaSCA工作站。

3.2 测试结果

经工作站测定,涂层破损为1%、2%、4%、6%、10%的试样的极化曲线如图3所示,海水电导率分别为4、3、2 S/m的极化曲线如图4所示,海水流速分

别为2、4 m/s的极化曲线如图5所示。

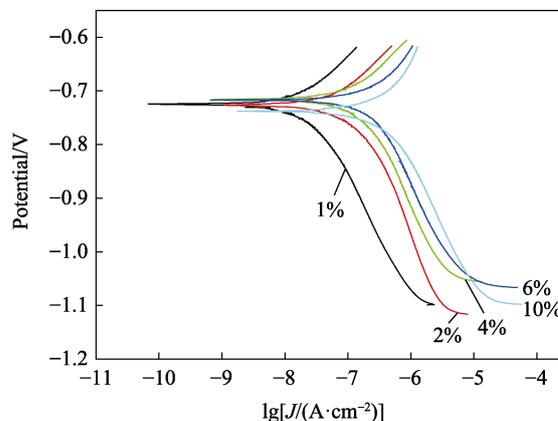


图3 不同涂层破损率的管线钢极化曲线
Fig.3 Polarization curves of pipeline steel with different coating failure rates

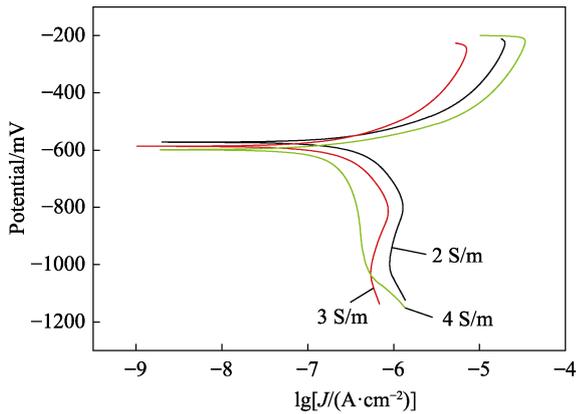


图 4 不同海水电导率的管线钢极化曲线
Fig.4 Polarization curves of pipeline steel with different seawater conductivity

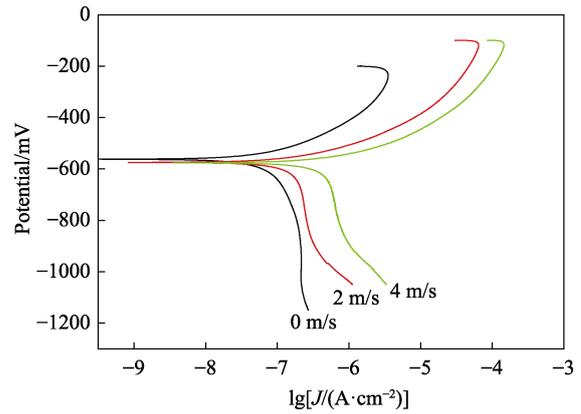


图 5 不同海水流速下的管线钢极化曲线
Fig.5 Polarization curves of pipeline steel under different seawater flow rates

4 结果与讨论

4.1 破损率对阴极保护效果影响

将极化曲线导入仿真软件中，生产边界条件文

件，利用边界元仿真软件对相应工况和环境下的模型进行计算，结果如图 6 所示。由图 6 可知，在涂层破损为 1% 的工况下，管道的阴极保护电位为 -988~ -1000 mV (vs.铜/硫酸铜电极，下同)；在涂层破损

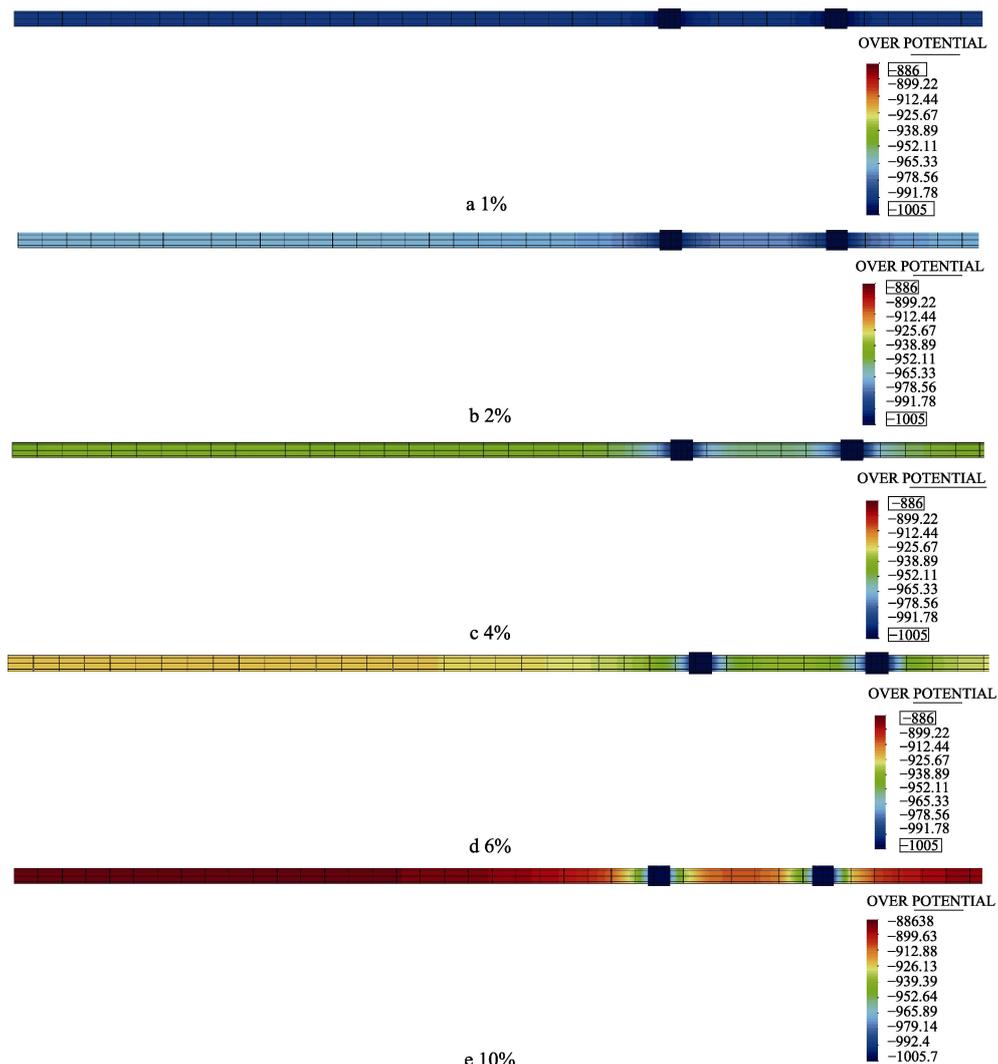


图 6 不同涂层破损率的计算电位
Fig.6 Calculated potential of the different coating breakage rates

率为 2%下, 管道的阴极保护电位为-965~-994 mV; 在涂层破损率为 4%下, 管道的阴极保护电位为-941~-988 mV; 在涂层破损率为 6%下, 管道的阴极保护电位为-920~-983 mV; 在涂层破损率为 10%下, 管道的阴极保护电位为-886~-975 mV。综上所述, 涂层破损率从 1%增加到 10%, 管道的阴极保护最正电位增加了 102 mV。这是由于涂层破损率越大, 管线钢需要的保护电流就越大, 致使保护效果降低。因此阴极保护方案设计过程中, 要考虑涂层破损带来的保护电位正移, 以免出现欠保护情况。

4.2 海水电导率对阴极保护效果影响

经边界元仿真软件计算, 结果如图 7 所示。由图

7 可知, 在海水电导率为 4 S/m 下, 该阴极保护方案中, 管道的阴极保护电位为-988~-1000 mV; 在海水电导率为 3 S/m 下, 管道的阴极保护电位为-985~-999 mV; 在海水电导率为 2 S/m 下, 管道的阴极保护电位为-978~-997mV。综上所述, 海水电导率从 4 S/m 减小到 2 S/m 时, 管道的阴极保护最正电位增加了 10 mV。这是由于海水的电导率减小, 即为电阻率增加, 电流流动的阻力增大, 使得保护效果降低。因此阴极保护方案设计过程中, 要考虑海水电导率的变化, 以免出现欠保护情况。

4.3 流速对阴极保护效果影响

经边界元仿真软件计算, 结果如图 8 所示。由图

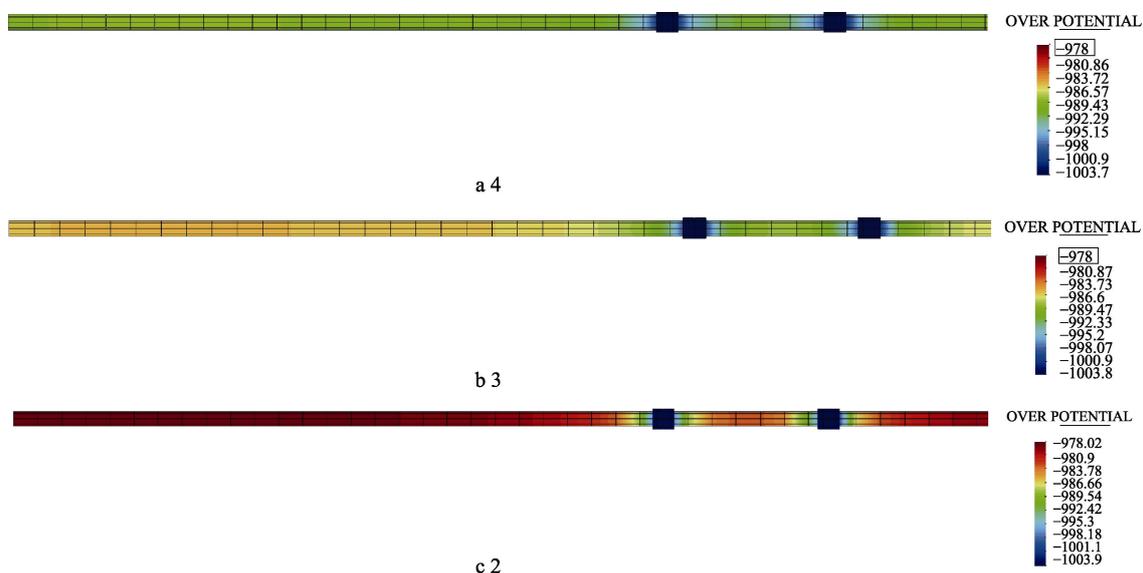


图 7 不同海水电导率的管道计算电位

Fig.7 Calculated potential of pipeline with different seawater conductivity

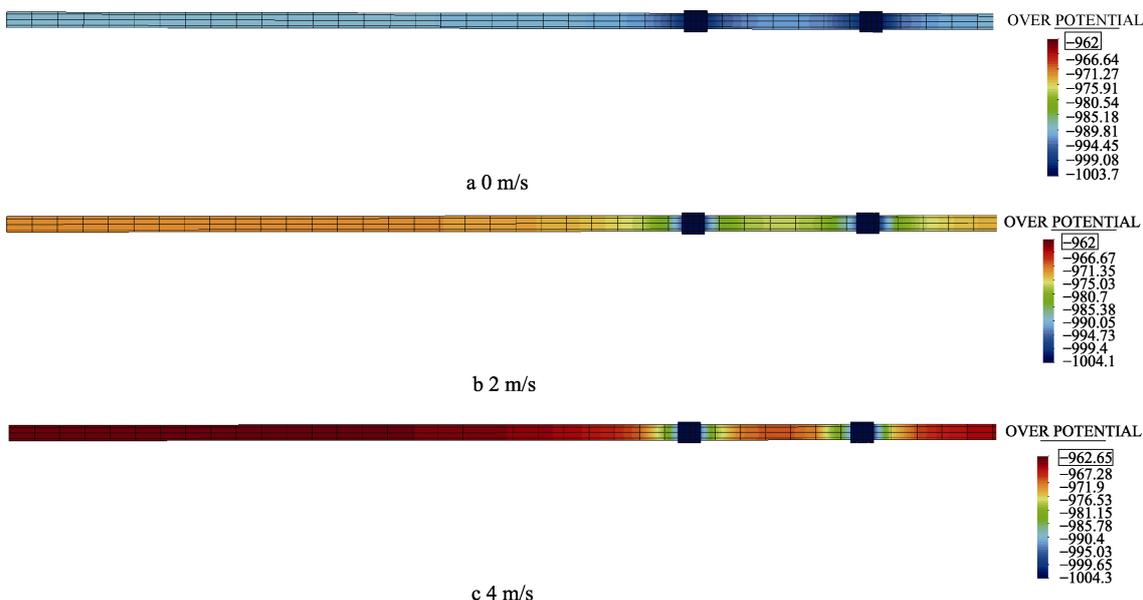


图 8 不同海水流速的管道计算电位

Fig.8 Calculated potential of pipeline with different seawater velocity

8 可得, 在海水流速为 0 m/s 工况下, 管道的阴极保护电位为 -988~-1000 mV; 在海水流速为 2 m/s 工况下, 管道的阴极保护电位为 -971~-996 mV; 在海水流速为 4 m/s 工况下, 管道的阴极保护电位为 -962~-994 mV。综上所述, 海水流速从 0 m/s 增加到 4 m/s, 管道的阴极保护最正电位增加了 26 mV。这是由于海水的流速增大, 会增大管线钢的腐蚀速率, 保护电流增大, 因此保护效果也会降低。在阴极保护方案设计过程中, 要考虑海水流速, 以免出现欠保护情况。

5 结论

1) 在同样的牺牲阳极保护方案下, 涂层破损率从 1% 增加到 10%, 管道的最正阴极保护电位增加了 102 mV; 海水电导率从 4 S/m 减小到 2 S/m, 管道的最正阴极保护电位增加了 10 mV; 海水流速从 0 m/s 增加到 4 m/s, 管道的最正阴极保护电位增加了 26 mV。

2) 由于涂层破损率的增加、海水电导率的减小和海水流速的增加会导致被保护金属所需的保护电流密度增大, 因此牺牲阳极的阴极保护效果会有不同程度的降低。在进行阴极保护设计时, 应充分考虑环境因素和涂层工况对保护效果带来的影响。

参考文献:

- [1] 朱承德. 海底管线的外部防护[J]. 材料保护, 1994(4): 30-33.
ZHU Cheng-de. External Protection of Submarine Pipelines[J]. Material Protection, 1994(4): 30-33.
- [2] 钱思成, 张有慧, 张国庆, 等. 海底管道防腐设计[C]// 2009 年全国石油和化学工业腐蚀与防护技术论坛论文集. 昆明: 中国石油工程建设协会, 2009.
QIAN Si-cheng, ZHANG You-hui, ZHANG Guo-qing, et al. Anticorrosion Design of Submarine Pipelines[C]// Proceedings of 2009 National Petroleum and Chemical Industry Corrosion and Protection Technology Forum. Kunming: 2009.
- [3] 程寒生, 周美珍, 郭宏, 等. 水下管汇设计关键技术分析和设计原则研究[J]. 中国海洋平台, 2011, 26(3): 30-32.
CHENG Han-sheng, ZHOU Mei-zhen, GUO Hong, et al. Key Technical Analysis and Design Principles of Underwater Manifold Design[J]. China Offshore Platform, 2011, 26(3): 30-32.
- [4] 郭明. 阴极保护技术的研究与应用[D]. 大庆: 大庆石油大学, 2006.
GUO Ming. Research and Application of Cathodic Protection Technology [D]. Daqing: Daqing Petroleum University, 2006.
- [5] 侯世忠. 阴极保护技术的研究与应用[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(10): 46-51.
HOU Shi-zhong. Research and Application of Cathodic Protection Technology [J]. Comprehensive Corrosion Control, 2018, 32(10): 46-51.
- [6] 高金吉, 王明春, 谈多林, 等. 石油化工设备的阴极保护[C]// '99 中国国际腐蚀控制大会论文集. 北京: 中国石油学会, 1999.
GAO Jin-ji, WANG Ming-chun, TAN Duo-lin, et al. Cathodic Protection of Petrochemical Equipment[C]// '99 China International Conference on Corrosion Control. Beijing: Chinese Petroleum Society, 1999.
- [7] 杨钟, 施以航, 黄一. 海底管道外表面阴极保护系统优化设计[J]. 中国舰船研究, 2013(4): 127-134.
YANG Zhong, SHI Yi-hang, HUANG Yi. Optimized Design of Cathodic Protection System on the Outer Surface of Submarine Pipeline[J]. Chinese Ship Research, 2013(4): 127-134.
- [8] 黄景. 油气管道阴极保护技术现状与展望[J]. 石化技术, 2017, 24(9): 83.
HUANG Jing. Current Status and Prospect of Cathodic Protection Technology for Oil and Gas Pipelines[J]. Petrochemical Technology, 2017, 24(9): 83.
- [9] 胡士信. 管道阴极保护技术现状与展望[J]. 腐蚀与防护, 2004(3): 3-11.
HU Shi-xin. Current Status and Prospect of Pipeline Cathodic Protection Technology[J]. Corrosion and Protection, 2004(3): 3-11.
- [10] 唐明华. 油气管道阴极保护[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.
TANG Ming-hua. Cathodic Protection of Oil and Gas Pipelines[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.
- [11] 薛致远, 毕武喜, 陈振华, 等. 油气管道阴极保护技术现状与展望[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 938-944.
XUE Zhi-yuan, BI Wu-xi, CHEN Zhen-hua, et al. Status and Prospect of Cathodic Protection Technology for Oil and Gas Pipelines[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2014, 33(9): 938-944.
- [12] 王强. 地下金属管道的腐蚀与阴极保护[M]. 青海: 青海人民出版社, 1984.
WANG Qiang. Corrosion and Cathodic Protection of Underground Metal Pipelines[M]. Qinghai: Qinghai People's Publishing House, 1984.
- [13] 胡士信. 值得借鉴的国外管道阴极保护技术[J]. 材料保护, 1993(4): 23-27.
HU Shi-xin. Foreign Pipeline Cathodic Protection Technology Worth Learning[J]. Materials Protection, 1993(4): 23-27.
- [14] 兰志刚. 海洋石油平台导管架阴极保护数值仿真研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
LAN Zhi-gang. Numerical Simulation Research on Cathodic Protection of Offshore Oil Platform Jacket[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2012.

- [15] 郭宇. 船舶与海洋结构物阴极保护电位数值仿真与优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
GUO Yu. Numerical Simulation and Optimal Design of Cathodic Protection Potential for Ships and Marine Structures[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [16] 张鹏. 滨海电厂凝汽器阴极保护数值仿真研究[D]. 广州: 广东海洋大学, 2015.
ZHANG Peng. Numerical Simulation Study of Cathodic Protection of Condensers in Binhai Power Plant[D]. Guangzhou: Guangdong Ocean University, 2015.
- [17] 张明. 电厂海水冷却系统泵体阴极保护数值仿真和优化设计[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.
ZHANG Ming. Numerical Simulation and Optimization Design of Cathodic Protection for Pump Body of Power Plant Seawater Cooling System[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.
- [18] 邢少华, 彭衍磊, 张繁, 等. 压载舱阴极保护系统性能仿真及优化[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1):11-15.
XING Shao-hua, PENG Yan-lei, ZHANG Fan, et al. Simulation and Optimization of the Performance of the Ballast Tank Cathodic Protection System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 11-15.
- [19] 赵菊梅. 舰船阴极保护电磁效应数值模拟仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
ZHAO Ju-mei. Numerical Simulation and Simulation Research on Electromagnetic Effect of Ship Cathodic Protection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [20] 兰志刚, 侯保荣, 王在峰, 等. 基于边界元技术的导管架阴极保护数值仿真研究[J]. 中国造船, 2010(2): 530-536.
LAN Zhi-gang, HOU Bao-rong, WANG Zai-feng, et al. Numerical Simulation Research on Jacket Cathode Protection Based on Boundary Element Technology[J]. Shipbuilding, 2010(2): 530-536.
- [21] 王秀通, 宋积文, 陈胜利, 等. 海洋设施阴极保护监测与仿真技术研究[C]// 第十届全国腐蚀大会摘要集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2019.
WANG Xiu-tong, SONG Ji-wen, CHEN Sheng-li, et al. Research on Cathodic Protection Monitoring and Simulation Technology for Marine Facilities[C]// Summary of the Tenth National Corrosion Conference. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019.